

绪 论

钢铁冶金是根据物理化学、热力学、动力学、传输学和反应工程学以及金属学等基本原理，从矿石中提取金属，经精炼，再用各种加工方法制成具有一定性能的钢铁材料的过程。从工艺过程角度可分为炼铁学和炼钢学两大领域。

炼铁工艺是以含铁矿石为主要原料，以焦炭、煤为主要能源，生产炼钢主原料——生铁（或铁水），并生产部分铸造生铁和铁合金的过程。

炼钢工艺是将铁水、直接还原铁或废钢（铁）经加热、熔化，通过化学反应去除金属液中的有害杂质元素，配加合金并浇铸成半成品——铸坯的过程。

公元前 14 世纪，人类开始使用铁器，这是人类文明的一大进步。钢铁冶金作为一门生产技术，最早起源于黑海南岸的山区。但在最初的一千多年内，冶金技术发展十分缓慢，至 14~16 世纪欧洲才出现水力鼓风的炼铁炉，用以生产铸铁，但基本上是经验式的实践，技术水平较低，生产规模不大。直至 16 世纪，欧洲的冶金著作《火法技艺》和《论冶金》才问世，对冶金技术的发展起到了承前启后的作用。我国明末（1637 年）宋应星所著《天工开物》中，较详细地记载了中国当时的冶金技术。可以说，到了 18 世纪末，冶金学才从自然科学中汲取营养，逐渐发展成一门独立的近代学科。

虽然人类使用钢铁的历史源远流长，但在 18 世纪中叶之前，人们对钢铁冶金尚没有系统的理性认识。1700~1890 年间，产生了一系列重要的技术发明创造，使炼铁工业得到蓬勃发展。1709 年，达比（A. Darby）用焦炭代替木炭炼铁获得成功，使冶金业摆脱了对木炭资源（森林）的依赖。1828 年，尼尔森（J. B. Neilson）采用热风使炼铁焦比降低，生产效率成倍提高。这些工作为深入研究钢铁冶金方法创造了条件。18 世纪下半叶，伯格曼（T. Bergman）在研究中作出了“钢是铁与碳交互作用的产物”的结论，并指出“氧化及还原是冶金的化学基础”，使人们对钢铁生产有了较正确的理解。在此基础上，伴随着近代自然科学理论和实验方法的产生和发展，逐步形成了钢铁冶金学科。特别是在冶金热力学等理论指导下，人们逐渐掌握了钢铁冶炼的内在规律。20 世纪下半叶以来电子计算机技术的发展，对钢铁产业产生了深刻的影响：一是计算机的应用使自动化技术与钢铁工艺紧密结合；二是电子器材对材料性能提出了新的要求，使钢铁冶金学发展成为材料科学的一个主要组成部分。应该说，近几十年来机械、电子、自动化、计算机、耐火材料等相关基础科学和理论的发展，为钢铁工业提供了先进的技术手段，加速了生产的现代化，同时也促进了钢铁冶金学科的发展、完善，开始了钢铁冶金的辉煌年代。

钢铁冶炼中的铁元素主要来自于铁矿石。从铁矿石中提取铁元素，有高炉炼铁、直接还原和熔融还原等方式，产品有液态铁水和固态金属铁。目前高炉炼铁仍是炼铁工艺的主流，原因在于

高炉炼铁技术较为成熟, 单体设备生产能力大, 消耗低, 铁水质量较好; 不足的是必须用高质量焦炭。在高炉上采用喷煤技术, 不仅降低了焦比, 而且由于可少用焦炭, 缩小了焦炭生产规模, 减少了环境污染, 相应地增强了高炉炼铁工艺的生命力。

20世纪50年代, 人们对高炉冶炼提出了以原料为基础, 采用大风、高温等技术手段的操作方针, 使炼铁技术有了新的进步。1959年, 我国太钢、本钢高炉突破中等冶炼强度的制约, 把冶炼强度提高到 $1.1\sim 1.3\text{t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, 开创了世界高冶炼强度的先例, 并在此基础上总结出高炉强化理论(吹透强化, 上下部调节剂), 促进了高炉炼铁学的发展。

20世纪70年代以来, 高炉炼铁技术朝着大型、高产、优质、低耗、长寿、清洁的方向发展。各项技术经济指标有明显提高, 平均大型高炉利用系数 $2.0\sim 2.2\text{t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, 有的大型高炉达到 $2.4\text{t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 以上, 入炉综合焦比 $510\sim 540\text{kg}/\text{t}$ 铁, 个别高炉降至 $480\text{kg}/\text{t}$ 铁以下, 达到国际先进水平。

高炉大型化是现代钢铁工业发展的重要标志之一。为了扩大生产规模, 提高质量, 降低消耗, 提高劳动生产率, 高炉必须大型化。据截至2002年底的粗略统计数据表明, 我国 1000m^3 以上高炉有46座, 其中最大的为宝钢3号高炉(4360m^3), 但同时还有很多的小高炉在产。淘汰技术落后的中小高炉, 逐步实行高炉的大型化, 是钢铁工业的发展趋势。

由生铁精炼成熟铁和钢的方法经历了许多变化。在古代, 人们用生铁进行氧化精炼的方法称为炒熟铁或炒钢, 把生铁、矿石和燃料共同放在简单的炉灶中, 鼓风使生铁融化成小滴。熔滴在下落时与矿石或空气中的氧起作用, 同时工匠用力搅拌, 使生铁中的碳充分氧化而被除去, 成为可锻造的熟铁。由于是在固态或半固态下冶炼, 劳动强度大, 不可能发展成大规模的生产, 得到的产品质量也很差。

现代炼钢始于1856年英国人亨利·贝塞麦(H. Bessemer)发明的酸性底吹转炉炼钢法。该方法首次解决了大规模生产液态钢的问题, 奠定了近代炼钢工艺的基础。由于空气与铁水直接作用, 贝塞麦炼钢法具有较高的冶炼速度, 成为当时主要的炼钢方法。但是, 贝塞麦工艺采用酸性炉衬, 不能造碱性炉渣, 因而不能进行脱磷和脱硫。1879年, 英国人托马斯(S. G. Thomas)发明了碱性底吹转炉炼钢法, 成功地解决了酸性转炉不能冶炼高磷生铁的问题。由于西欧许多铁矿为高磷铁矿, 直到20世纪70年代末, 托马斯炼钢法仍为法国、卢森堡、比利时等国的一些钢铁厂所采用。几乎与贝塞麦炼钢工艺开发成功的同时, 1856年, 平炉炼钢方法(称为Siemens-Martin法)也发明成功。最早的平炉也是酸性炉衬, 随后碱性平炉炼钢方法也很快开发成功。当时, 平炉炼钢操作和控制较转炉炼钢平稳, 能适用于各种原料条件, 生铁和废钢的比例可以在很宽的范围内变化。随后在1899年, 电弧炉炼钢方法也开发成功。至20世纪50年代氧气转炉炼钢发明前, 平炉为世界上最主要的炼钢方法。

第二次世界大战结束后, 世界钢铁工业进入了快速发展时期。这一期间开发成功的氧气顶吹转炉炼钢技术和钢水连续浇铸技术, 对随后的钢铁工业发展起到了非常重要的推动作用。1952年, 奥地利发明氧气顶吹转炉炼钢方法, 由于具有反应速度快, 热效率高、钢质量好和品种多等优点, 迅速被日本、西欧所采用。20世纪70年代, 氧气转炉取代平炉成为主要的炼钢设备。在

氧气顶吹转炉炼钢迅速发展的同时,法、德、美等国发明成功氧气底吹转炉炼钢方法,通过喷吹甲烷、重油、柴油等对喷口进行冷却,使纯氧能从炉底吹入熔池而不致损坏炉底。20世纪80年代中后期,西欧、日、美等相继开发氧气顶底复吹转炉炼钢方法,氧气由顶部氧枪供入,同时由炉底喷口吹入氩、氮等气体对熔池进行搅拌(炉底也可吹入少量氧气)。氧气顶底复吹转炉炼钢同时具备顶吹转炉炼钢化渣好、废钢用量多,以及氧气底吹转炉炼钢熔池搅拌好、铁和锰氧化损失少、金属喷溅少等优点,目前世界上较大容量的炼钢转炉多数采用了氧气顶底复吹转炉炼钢工艺。

最初的液态金属连续浇铸专利于1886年问世。1933年,德国人容汉斯(S. Junghans)发明了振动式连铸结晶器,大大减少了拉漏率,而后连铸开始在有色金属工业中采用。1954年,苏格兰人哈利德(Halliday)开发的连铸结晶器“负滑脱”振动技术,真正有效地防止了铸坯与结晶器壁的粘连,使钢连铸的关键技术得到突破,从而使此技术步入工业应用阶段。与模铸相比,连铸在建设投资、节能、钢材收得率、产量和质量等方面具有明显的优势。20世纪60~70年代,日本、西欧钢铁工业开始大规模采用连铸。至20世纪80年代,世界连铸比超过模铸比,日、德、法、意、韩等钢铁发达国家连铸技术迅速发展,连铸比均超过了90%。

连续铸钢技术的采用不仅完全改变了旧的铸钢工序,还带动了整个钢铁厂的结构优化,因此被许多冶金学家称之为钢铁工业的一次“技术革命”。由于连铸生产节奏快,为了适应连铸,必须缩短钢的冶炼时间。因此,传统的炼钢工序与功能被进一步分解,铁水预处理、电炉短流程、钢水炉外精炼等重大技术因此而快速发展。

铁水预处理最初主要用于冶炼少数高级钢或用于高硫铁水辅助脱硫,脱硫剂主要使用镁焦、 CaC_2 等(随后又出现向铁水内喷吹 CaO-CaC_2 、Mg进行铁水脱硫的技术)。20世纪80年代,日本钢铁厂开始大规模采用铁水“三脱”预处理(脱硅、脱磷、脱硫),在高炉出铁沟喷吹氧化铁和CaO进行脱硅,在铁水包或混铁车内喷粉进行脱硫和脱磷处理。采用铁水“三脱”预处理和钢水炉外精炼后,转炉的功能由炼钢简化为“钢水的脱碳和提温容器”,转炉吹炼时间减少至9~12min。此外,炼钢产生的炉渣量显著减少,减轻了炼钢的环境负荷,

传统电弧炉炼钢时间长达4~6h,采用连铸后,必须缩短电弧炉冶炼时间以保证与连铸节奏相匹配。现代化的电弧炉炼钢采用超高功率、余热预热废钢、氧燃助熔以及二次精炼等技术,电弧炉冶炼功能也由传统的熔化、脱碳、脱磷、脱硫、脱氧等简化为熔化和脱碳升温,冶炼时间缩短至40~50min。与氧气炼钢工艺相比,电弧炉炼钢具有建设投资少、流程短、劳动生产率高等优点,近年来电弧炉炼钢工艺发展很快,在美国、意大利、印度和马来西亚等国,电弧炉炼钢产量已超过氧气转炉炼钢产量。

20世纪50年代中后期,DH、RH等钢水炉外精炼方法开发成功,最初主要用于高级钢脱除[N]、[H]等。20世纪70年代后,尤其是钢铁工业大规模采用连铸技术后,炉外精炼技术迅速发展,精炼方式包括吹氩搅拌、喂线、氩氧精炼、电弧加热、真空处理等多种方式,功能则由最初的钢水脱气发展为加热升温、渣-钢精炼脱硫和脱氧、超低碳钢脱碳、成分微调、去除夹杂物等多种功能。目前,现代化钢厂钢水炉外精炼比接近100%,原来由转炉和电弧炉炼钢承担的脱

硫、深度脱碳、脱氧、合金化、夹杂物控制等多数转为由炉外精炼工序承担。

毋庸讳言,进入铁器时代以来,钢铁一直是人类社会所需的最重要材料。在 21 世纪,钢铁材料仍将是人类社会最主要的和不可替代的结构材料,也是产量最大、覆盖面最广的功能材料。2004 年,全世界钢产量首次突破 10 亿 t。因此,作为一种重要的基础原材料,钢铁在经济发展中发挥着举足轻重的作用。尽管近年来钢铁材料面临着陶瓷材料、高分子材料、有色金属材料等的挑战,但由于在铁矿石储量、生产成本、回收再利用率、良好的综合性能等方面具有明显优势,可以预期,钢铁在材料行业中所占据的统治地位,在今后很长的时期内不会改变。

近几十年来,钢铁工业的科学技术进步得到了前所未有的发展,推动了钢铁工业在产品、工艺和设备上的更新换代,使世界钢铁工业朝着高效、低耗、清洁和优质方向发展。随着高炉喷吹煤粉、高炉长寿、熔融还原、铁水三脱、炉外精炼、顶底复吹、薄板坯连铸连轧等一大批新技术被开发应用;信息网络、仿真模拟、人工智能等高新技术在钢铁制造过程中应用水平不断提高,中国钢铁工业取得了令人瞩目的成就。全国粗钢产量已连续 9 年位居世界第一,2004 年更高达 2.7 亿 t。此外,我国的钢铁工业装备、工艺技术和产品质量也取得了显著的进步,已达到或接近国际先进水平。

虽然我国是世界钢铁大国,但与发达国家人均钢消费量 400~500kg 相比,我国的人均钢消费量还比较低,到了 2002 年才超过世界的平均值,达到 141kg;在生产成本、原燃料消耗和环境保护等方面与世界先进水平也存在较大差距,而且有的优质钢铁材料仍依赖进口。要满足发展经济、全面建设小康社会的需要,仍需大力发展钢铁材料。西部大开发,东北老工业基地的振兴,建筑业、能源、交通、汽车、机械、石油、化学、轻工等基础工业,都是钢材消耗大户。由此可见,从满足国家发展战略的需求,同时为钢铁行业提供先进技术和培养技术人才的角度出发,中国钢铁工业将会有更大的发展。

炼铁篇

1 现代高炉炼铁工艺

1.1 高炉炼铁生产流程

高炉炼铁的本质是铁的还原过程，即使用焦炭做燃料和还原剂，在高温下将铁矿石或含铁原料中的铁从氧化物或矿物状态（如 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 Fe_2SiO_4 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{TiO}_2$ 等）还原为液态生铁。

冶炼过程中，炉料（矿石、熔剂、焦炭）按照确定的比例通过装料设备分批地从炉顶装入炉内，高温热风从下部风口鼓入，与焦炭反应生成高温还原性煤气；炉料在下降过程中被加热、还原、熔化、造渣，发生一系列物理化学变化，最后生成液态渣、铁聚集于炉缸，周期地从高炉排出。煤气流上升过程中，温度不断降低，成分逐渐变化，最后形成高炉煤气从炉顶排出。

高炉炼铁生产工艺过程如图 1-1 所示。

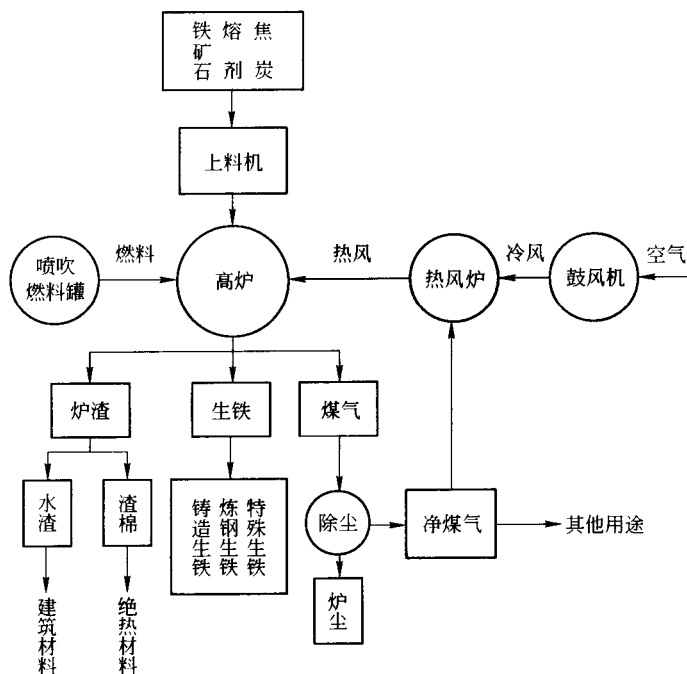


图 1-1 现代高炉炼铁生产流程图

由此可见，高炉炼铁生产过程非常复杂，除高炉本体以外，还包括有原燃料系统、上料系统、送风系统、渣铁处理系统、煤气处理系统等辅助系统。通常，辅助系统的建设投资是高炉本体的4~5倍。生产中，各个系统互相配合、互相制约，形成一个连续的、大规模的高温生产过程。

此外，高炉生产还具有连续、不间断的特点。高炉开炉之后，整个系统必须日以继夜地进行生产，除了计划检修和特殊事故暂时休风外，一般要到高炉一代寿命终了时才停炉。

1.2 高炉本体及主要构成

高炉本体是冶炼生铁的主体设备。它是由耐火材料砌筑成竖式圆筒形，外有钢板炉壳加固密封，内嵌冷却设备保护（图1-2）。

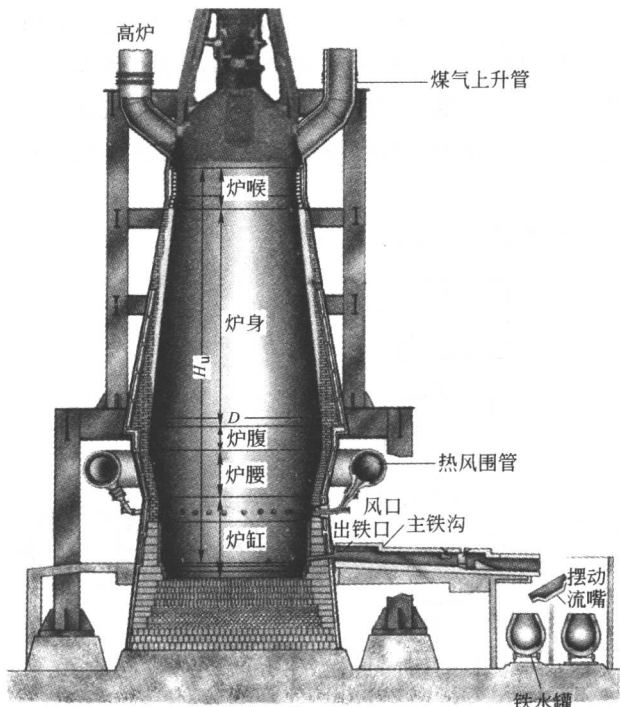


图 1-2 现代高炉炉体剖面图

高炉内部工作空间的形状称为高炉内型。高炉内型从下往上分为炉缸、炉腹、炉腰、炉身和炉喉五个部分，该容积总和为它的有效容积，反映了高炉所具备的生产能力。

高炉内型的形状和尺寸主要与原、燃料条件和操作制度有关，合理的内型有利于高炉操作顺利进行、高产、低耗。随着冶炼条件的改善，装备水平和操作水平的提高，高炉内型逐步向矮胖型（以 H_0/D 表示）发展，见表 1-1。

表 1-1 高炉内型变化情况

高炉容积 /m ³	H ₀ /D		高炉容积 /m ³	H ₀ /D	
	20 世纪 70~80 年代	20 世纪 90 年代以后		20 世纪 70~80 年代	20 世纪 90 年代以后
1000~2000	<2.9	2.5~2.7	<300	>3.5	>3.2
300~1000	2.9~3.5	2.7~3.2			

1.2.1 高炉内衬

高炉内耐火材料砌筑的实体称为高炉内衬，其作用是形成高炉工作空间。由于高炉冶炼过程温度高，且存在复杂的物理化学反应，炉衬在冶炼过程中将受到侵蚀和破坏，当炉衬被侵蚀到一定程度时，需要采取措施修补。停炉大修便是高炉一代寿命的终止。

对高炉内衬的基本要求如下：1) 各部位内衬与热流强度相适应，以保持在强热流冲击下内衬的稳定性；2) 各部位内衬与侵蚀破坏机理相适应。由于炉衬的侵蚀和破坏与冶炼条件密切相关，不同位置的耐火材料受侵蚀破坏机理不同，因此各部位采用不同的内衬材料，既可以延缓内衬破损速度，又有利于降低高炉建设成本。

通常，高炉炉衬以陶瓷质材料（包括黏土质和高铝质等）和炭质材料（炭砖、炭捣石墨等）砌筑。

1.2.2 高炉冷却设备

炉衬的温度状态是决定其侵蚀速度的重要因素之一。因此，采用适宜的冷却设备维持高炉炉衬在一定温度下工作，可使其不失去强度，维持炉型。使用冷却设备还可保护炉壳及各种钢结构，使其不因受热变形而破坏。通过使用冷却设备，在高炉的某些部位还可形成渣皮，从而保护炉衬，代替炉衬工作。

冷却炉衬的方法是：将通有冷却介质的金属冷却器件插入砌体或置于砌体外缘表面，由冷却介质将进入炉衬的热量带走，从而使输入和输出炉衬的热流平衡，保持炉衬工作表面稳定。

根据各部位热负荷及结构的不同，高炉冷却可采取多种形式和方法。常见的高炉冷却设备有冷却壁、冷却水箱、外部喷水冷却、水冷炉底等多种形式和方法。

1.2.3 高炉附属系统

除本体外，高炉有许多附属设备。

(1) 供料系统。包括贮矿槽、过筛、输送、称量及上料机等，主要任务是保证及时、准确、稳定地将合格原料从贮矿槽送上高炉炉顶。

(2) 送风系统。包括鼓风机、加湿或脱湿装置、热风炉及一系列管道、阀门，主要任务是保证连续可靠地供给高炉冶炼所需数量和足够温度的热风。

(3) 除尘系统。包括粗除尘（如重力除尘器）、半精细除尘（如洗涤塔）、精细除尘（如文氏

管、静电除尘器), 主要任务是保证回收高炉煤气, 使其含尘量降到 $15\text{mg}/\text{m}^3$ 左右, 以便利用。

(4) 渣、铁处理系统。包括炉前出铁场及其设备, 渣、铁输送设备, 铸铁机, 生铁炉外处理设备, 水渣场设备等, 主要任务是及时处理高炉排放出的渣、铁, 保证高炉生产正常运行, 获得合乎规格的生铁和炉渣产品。

(5) 燃料喷吹系统。包括燃料的制备、贮存, 空压机、高压泵和一系列管道阀门输送设备及喷嘴等, 任务是保证喷入高炉所需之燃料, 以代替部分焦炭, 降低焦炭消耗。

1.2.4 高炉区域划分

将正在运行中的高炉突然停炉并进行解剖分析, 结果表明, 根据物料存在形态的不同, 可将高炉划分为五个区域: 块状带、软熔带、滴落带、燃烧带、渣铁盛聚带(图 1-3)。

各区域内进行的主要反应及特征分别为:

(1) 块状带。炉料中水分蒸发及受热分解, 铁矿石还原, 炉料与煤气热交换; 焦炭与矿石层状交替分布, 呈固体状态; 以气固相反应为主。

(2) 软熔带。炉料在该区域软化, 在下部边界开始熔融滴落; 主要进行直接还原反应, 初渣形成。

(3) 滴落带。滴落的液态渣铁与煤气及固体碳之间进行多种复杂的化学反应。

(4) 燃烧带。喷入的燃料与热风发生燃烧反应, 产生高热煤气, 是炉内温度最高的区域。

(5) 渣铁盛聚带。在渣铁层间的交界面及铁滴穿过渣层时发生渣金反应。

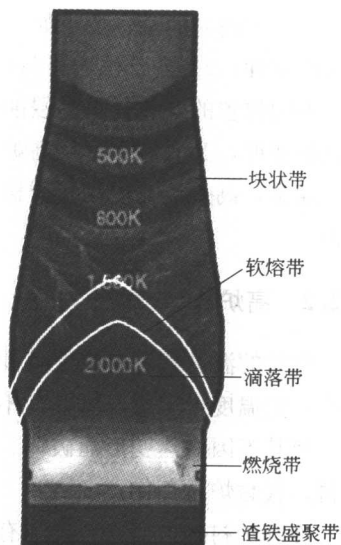


图 1-3 高炉料柱结构及区域分布

1.3 高炉冶炼产品

高炉冶炼的主要产品是生铁, 炉渣和高炉煤气为副产品。

1.3.1 生铁

生铁是铁与碳及其他一些元素的合金。通常, 生铁含铁 94% 左右, 含碳 4% 左右, 其余为硅、锰、磷、硫等少量元素。

一般来说, 生铁和钢的化学成分主要差别是含碳量。钢中含碳量最高不超过 2.11%。高炉生铁含碳量在 2.5%~4.5% 范围, 铸铁中不超过 5.0% (此时 Fe_3C 含量约占 75%。当铸铁中 Fe_3C 达 100% 时, 其含碳量为 6.67%)。当铸铁中 $w(\text{C}) > 5.0\%$ 时, 铸铁甚脆, 没有实用价值。而含碳量在 1.6%~2.5% 之间的钢铁材料, 由于缺乏实用性, 一般不进行工业生产。

生铁可分为炼钢生铁、铸造生铁。炼钢生铁供转炉、电炉炼钢使用, 约占生铁产量的 80%~90%。铸造生铁又称为翻砂铁或灰口铁, 主要用于生产耐压铸件, 约占生铁产量的 10% 左右。

铸造生铁的主要特点是含硅较高，在 1.25%~4.25% 之间。硅在生铁中能促进石墨化，使化合碳游离成石墨炭，增强铸件的韧性、耐冲击性并易于切削加工。炼钢生铁和铸造生铁成分的国家标准见表 1-2、表 1-3。

表 1-2 炼钢生铁国家标准 (GB717—82)

铁 号	牌 号		炼 04	炼 08	炼 10
	代 号		L04	L08	L10
化学成分 /%	Si		≤0.45	>0.45~0.85	>0.85~1.25
	Mn	1 组	≤0.30		
		2 组	>0.30~0.50		
		3 组	>0.50		
	P	1 级	≤0.15		
		2 级	>0.15~0.25		
		3 级	>0.25~0.40		
	S	特类	≤0.02		
		1 类	>0.02~0.03		
		2 类	>0.03~0.05		
3 类		>0.05~0.07			

表 1-3 铸造生铁国家标准 (GB718—82)

铁 号	牌 号		铸 34	铸 30	铸 26	铸 22	铸 18	铸 14
	代 号		Z34	Z30	Z26	Z22	Z18	Z14
化学成分 /%	C		>3.3					
	Si		>3.2~3.6	>2.8~3.2	>2.4~2.8	>2.0~2.4	>1.6~2.0	>1.25~1.6
	Mn	1 级	≤0.50					
		2 级	>0.50~0.90					
		3 级	0.90~1.30					
	P	1 级	≤0.06					
		2 级	>0.06~0.10					
		3 级	>0.10~0.20					
		4 级	>0.20~0.40					
		5 级	>0.40~0.90					
S	1 类	≤0.03					≤0.04	
	2 类	≤0.04					≤0.05	
	3 类	≤0.05					≤0.06	

高炉还可生产特殊生铁,如锰铁、硅铁、镜铁(Mn 10%~25%)、硅镜铁(Si 9%~13%, Mn 18%~24%)等,主要用作炼钢脱氧剂和合金化剂。此外,生铁中还可能含有部分微量元素。生铁中微量元素含量之和(铅、锡、锑、砷、钽、钒、铬、锌)为指标,当其小于0.1%时称为高纯生铁。国内外适宜生产高纯生铁的矿源稀少。我国本钢生铁含磷、硫极低,微量元素含量总和小于0.08%,素有“人参铁”之称。

1.3.2 高炉渣

由于冶炼矿石品位、焦比及焦炭灰分的不同,高炉生产每吨生铁产生的炉渣量差异很大。我国大中型高炉的单位生铁渣量在0.3~0.5t之间。一些原料条件差、技术水平低的高炉,单位生铁渣量甚至超过0.6t。

高炉渣主要是由钙、镁、硅、铝的氧化物构成的复杂硅酸盐系。一般高炉渣的成分 w (质量分数)为:CaO 35%~44%;SiO₂ 32%~42%;Al₂O₃ 6%~16%;MgO 4%~13%。

此外,高炉渣中含有少量硫化物和碳化物,如MnO、FeO、CaS等。使用特殊矿冶炼的高炉渣还含有其他物质,如我国包钢高炉渣还含有CaF₂、K₂O、Na₂O,攀钢高炉渣中含有TiO₂、V₂O₅。

高炉渣的工业用途广泛。如在炉前急冷粒化成水渣,制成水泥和建筑材料;酸性渣还可在炉前用蒸汽吹成渣棉,作为绝热材料。炉渣还可代替天然碎石作为路基材料。冶炼多元素共生的复合矿时,炉渣中常富集有多种元素(如稀土、钛等),这类炉渣可进一步利用。

高炉炉渣出炉温度通常为1400~1450℃,热含量1680~1900kJ/kg,对于这部分显热,目前尚无很好的利用方法。

1.3.3 高炉煤气

冶炼每吨生铁可产生1600~3000m³的高炉煤气,其中含CO₂ 0~25%,含H₂ 1%~3%,还有少量甲烷(CH₄)等可燃性气体。从高炉排出的煤气中含有大量的炉料粉尘,经过除尘处理可使含尘量降到10~20mg/m³。除尘处理后的高炉煤气发热值约为3350~3770kJ/m³,是良好的气体燃料。但高炉冶炼产生的煤气量、成分及发热值与高炉操作参数及产品种类有关。如高炉冶炼铁合金时,煤气中几乎没有CO₂。

高炉煤气是钢铁联合企业的重要二次能源,主要用作热风炉燃料,还可供动力、炼焦、烧结、炼钢、轧钢等部门使用。

1.4 高炉技术经济指标

高炉生产的技术水平和经济效果可用如下技术经济指标来衡量:

(1) 有效容积利用系数(η_v):指高炉单位有效容积的日产铁量。

$$\eta_v = \frac{P}{V_u} \quad (1-1)$$

式中 P ——生铁日产量, t/d;

V_0 ——高炉有效容积, m^3 。

可见, 利用系数愈大, 生铁产量愈高, 高炉的生产率也就愈高。 P 和 η_0 都是生产率指标。对一定容积的高炉, η_0 随 P 成正比地增加。对不同容积高炉, P 无可比性, 而 η_0 可比。

式中生铁日产量是以炼钢生铁为校准计算的, 其他各种牌号的生铁可按冶炼难易程度折合为炼钢生铁吨数。铸造生铁的折算系数随硅含量不同而存在差异, 通常为 1.14~1.34。

一般高炉有效容积利用系数为 2.3~2.8t/($m^3 \cdot d$), 先进高炉达 3t/($m^3 \cdot d$) 以上。

(2) 焦比 (K): 生产每吨生铁所消耗的焦炭量。对高炉生产而言, 焦比越低越好。

$$K = \frac{Q}{P} \quad (1-2)$$

式中 Q ——焦炭日消耗量, kg/d。

喷吹燃料时, 高炉的能耗情况用燃料比 ($K_{\text{燃}}$) 表示, 即每 1t 生铁耗用各种入炉燃料之总和。

$$K_{\text{燃}} = (K_{\text{焦炭}} + K_{\text{煤粉}} + K_{\text{重油}} + \dots) \quad (1-3)$$

综合焦比 ($K_{\text{综}}$) 是生产每吨生铁实际耗用的焦炭 (焦比 K) 以及各种辅助燃料折算为相应的干焦 ($K_{\text{干}}$) 的综合。

$$K_{\text{综}} = (K + K_{\text{干}}) \quad (1-4)$$

不同辅助燃料对干焦的置换比差异较大。通常煤粉为 0.7~0.8kg/kg, 天然气为 0.65kg/kg, 重油为 1.2kg/kg, 焦粉为 0.9kg/kg, 沥青为 1.0kg/kg。

现代大中型高炉焦比一般在 400kg/t 左右, 燃料比一般在 500kg/t 左右。我国宝钢三座高炉 2003 年燃料比平均值为 492.5kg/t。

(3) 冶炼强度 (I): 单位体积高炉有效容积焦炭日消耗量。

$$I = \frac{Q}{V_0} \quad (1-5)$$

冶炼强度是标志高炉强化程度的指标之一。在喷吹燃料条件下, 相应应有综合冶炼强度 ($I_{\text{综}}$), 即不仅计算焦炭消耗量, 还计算喷吹燃料按置换比折合成的焦炭量。

由式 (1-1)、式 (1-2) 和式 (1-3) 可推导出利用系数、焦比和冶炼强度三者之间的关系为:

$$\eta_0 = \frac{I}{K} \quad (1-6)$$

利用系数 η_0 与冶炼强度 I 成正比, 与焦比 K 成反比。要提高利用系数, 强化高炉生产, 应从降低焦比和提高冶炼强度两方面考虑。在当前能源紧张的情况下, 首先应考虑降低焦比 (燃料比)。

(4) 焦炭负荷: 每批炉料中铁、锰矿石的总重量与焦炭重量之比, 是用以评估燃料利用水

平, 调节配料的重要参数。

(5) 生铁合格率: 指合格生铁量占高炉总产量的百分数。此外, 优质生铁占生铁总量的百分数称为优质率。合格率和优质率都是生铁质量指标。对生铁质量的考查主要看其化学成分(如硫和硅)是否符合国家标准。

(6) 休风率: 高炉休风时间占规定作业时间的百分数。降低休风率是增产节约的重要途径。

(7) 生铁成本: 生产 1t 生铁所需的费用。它是衡量高炉生产经济效益的重要指标。

(8) 高炉一代寿命(炉龄): 通常指从高炉点火开炉到停炉大修, 或高炉相邻两次大修之间的冶炼时间。一般大高炉的一代寿命在 10 年左右, 有的高达 18 年。衡量炉龄的另一个指标是每 1m^3 炉容在一代炉龄期内的累计产铁量。先进高炉平均达 $5000\text{t}/\text{m}^3$, 我国宝钢 2 号高炉已接近 $10000\text{t}/\text{m}^3$ 。

表 1-4、表 1-5 分别为近年我国重点钢铁企业、国外先进高炉炼铁技术经济指标。

表 1-4 我国重点钢铁企业高炉炼铁技术经济指标

指 标	2003 年	2002 年	2001 年	2000 年	国际高炉先进水平
全国生铁产量/万 t	20231	17024	14893	13103	
利用系数/ $\text{t} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$	2.474	2.488	2.337	2.233	大高炉 2.68
燃料比/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		526	530	533	439
入炉焦比/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	433	415	423	429	240
喷煤比/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	118	125	124	118	266
热风温度/ $^{\circ}\text{C}$	1082	1066	1081	1034	1300
入炉矿品位/%	58.49	58.18	57.28	56.81	烧 60.0; 球 67.0
休风率/%	1.86	1.61	2.36	2.03	
炼铁工序能耗(标煤)/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	464.68	454.13	448	464	437

表 1-5 世界若干先进高炉的主要数据

企 业 名 称	利用系数 / $\text{t} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	焦比 / $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	煤比 / $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	风温 / $^{\circ}\text{C}$	渣铁比 / $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
日本钢管公司福山厂	2.500	386	89	1050	329
日本新日铁公司大分厂(1号炉)	2.271	352	121	1208	305
日本新日铁公司大分厂(2号炉)	2.260	347	127	1210	306
日本神户制钢加古川厂	2.140	320	201	1181	282
韩国浦项公司阳光厂	2.310	318	181	1206	280
韩国浦项公司浦项厂(3号炉)	2.135	397	106	1105	315
韩国浦项公司浦项(4号炉)	2.282	366	145	1115	311
中国台湾中钢公司	2.130	409	85	1160	291
美国钢铁公司加里厂	3.010	318	181	1150	252

续表 1-5

企 业 名 称	利用系数 /t · (m ³ · d) ⁻¹	焦比 /kg · t ⁻¹	煤比 /kg · t ⁻¹	风温 /°C	渣铁比 /kg · t ⁻¹
德国蒂森公司施维尔根厂	2.200	320	179	1220	248
法国索拉克公司敦刻尔克厂	2.100	309	170	1170	313
荷兰霍高文公司艾默伊登厂	2.200	336	177	1160	236
意大利 LIVA 公司塔兰托厂	2.460	348	133	1200	288
芬兰罗德洛基公司拉赫厂	2.830	340	79 (重油)	1080	220

思 考 题

- 1 高炉炼铁的工艺流程由哪几部分组成?
- 2 高炉炼铁有哪些技术经济指标?
- 3 高炉生产有哪些特点?
- 4 高炉生产有哪些产品和副产品, 各有何用途?

2 高炉炼铁原料

炼铁原料的发展趋势是采用精料。通过改进原燃料的质量，保证高炉在高压、高风温、高负荷的生产条件下能稳定顺行，为降低焦比和提高冶炼强度打下物质基础。精料的具体内容可概括为“高、熟、净，匀、小、稳”六个字。此外，应重视炉料的高温冶金性能及合理的炉料结构。

2.1 铁矿石和燃料

高炉炼铁必备的三种原料中，焦炭作为燃料和还原剂，是主要能源；熔剂，如石灰石，主要用来助熔、造渣；铁矿石则是冶炼的对象。这些原料是高炉冶炼的物质基础，其质量对冶炼过程及冶炼效果影响极大。

2.1.1 铁矿石

2.1.1.1 铁矿石分类及特性

高炉冶炼用的铁矿石有天然富矿和人造富矿两大类。含铁量在 50% 以上的天然富矿经适当破碎、筛分处理后可直接用于高炉冶炼。贫铁矿一般不能直接入炉，需要破碎、富选并重新造块，制成人造富矿（烧结矿或球团矿）再入高炉。人造富矿含铁量一般在 55%~65% 之间。由于人造富矿事先经过焙烧或烧结高温处理，因此又称为熟料，其冶金性能远比天然富矿优越，是现代高炉冶炼的主要原料。天然块矿通常称为生料。

我国富矿储量很少，多数是含 Fe 30% 左右的贫矿，需要经过富选才能使用。

A 矿石和脉石

能从中经济合理地提炼出金属来的矿物称为矿石。如铁元素广泛地、程度不同地分布在地壳的岩石和土壤中，有的比较集中，形成天然的富铁矿，可以直接利用来炼铁；有的比较分散，形成贫铁矿，用于冶炼既困难又不经济。随着选矿和冶炼技术的发展，矿石的来源和范围不断扩大。含铁较低的贫矿经过富选也可用来炼铁。

矿石中除了用来提取金属的有用矿物外，还含有一些工业上没有提炼价值的矿物或岩石，称为脉石。对冶炼不利的脉石矿物，应在选矿和其他处理过程中尽量去除。但矿石中脉石的结构和分布直接影响矿石的选冶性能。如果含铁矿物结晶颗粒比较粗大，则在选矿过程中易于实现有用矿物的单体分离；反之，如果含铁矿物呈细粒结晶嵌布在脉石中，则要进一步细磨矿石才能分离出有用矿物。

B 天然铁矿石的分类及特征

天然铁矿石按其主要矿物分为磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿和菱铁矿等几种，主要矿物组成及特

征见表 2-1。

表 2-1 常见铁矿石的组成及特征

名称	主要成分 化学式	理论含 Fe 量 /%	实际富矿含 Fe 量 /%	颜色	最低工业品位 /%	特 性
磁铁矿	Fe_3O_4	72.4	45~70	黑色	20~25	P、S 高，坚硬，致密，难还原
赤铁矿	Fe_2O_3	70.0	55~60	红色	30	P、S 低，质软，易碎，易还原
褐铁矿	$n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$	55.2~66.1	37~55	黄褐色	30	P 高，质软疏松，易还原
菱铁矿	FeCO_3	48.2	30~40	灰浅黄	25	易破碎，焙烧后易还原

赤铁矿，又称红矿，主要含铁矿物为 Fe_2O_3 ，其中 Fe 70%，O 30%。赤铁矿有 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 两种晶形。常温下无磁性。但在一定温度下，当 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 转变为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 时，便具有了磁性。色泽为赤褐色到暗红色，由于其硫、磷含量低，还原性较磁铁矿好，是优良原料。赤铁矿的熔融温度为：1580~1640℃。

磁铁矿，主要含铁矿物为 Fe_3O_4 ，具有磁性。其化学组成可视为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$ ，其中 FeO 30%， Fe_2O_3 69%；TFe 72.4%，O 27.6%。磁铁矿颜色为灰色或黑色，由于其结晶结构致密，所以还原性比其他铁矿差。磁铁矿的熔融温度为：1500~1580℃。这种矿物与 TiO_2 和 V_2O_5 共生，叫钒钛磁铁矿；只与 TiO_2 共生的叫钛磁铁矿，其他常见混入元素还有镍、铬、钴等。在自然界中纯磁铁矿很少见，常常由于地表氧化作用使部分磁铁矿氧化转变为半假象赤铁矿和假象赤铁矿。假象赤铁矿是仍保留磁铁矿的外形，但 Fe_3O_4 已被氧化成 Fe_2O_3 的矿石。一般用 TFe/FeO 的比值来区分：

$\text{TFe}/\text{FeO}=2.33$	为纯磁铁矿石
$\text{TFe}/\text{FeO}<3.5$	为磁铁矿石
$\text{TFe}/\text{FeO}=3.5\sim 7.0$	为半假象赤铁矿石
$\text{TFe}/\text{FeO}>7.0$	为假象赤铁矿石

式中 TFe——矿石总含铁量（又称全铁），%；

FeO——矿石 FeO 含量，%。

褐铁矿，通常指含水氧化铁的总称。如 $3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 称为水针铁矿； $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 才称褐铁矿。这类矿石一般含铁较低，但经过焙烧去除结晶水后，含铁量显著上升。颜色为浅褐色、深褐色或黑色，硫、磷、砷等有害杂质一般多。

菱铁矿，又称碳酸铁矿石，因其晶体为菱面体而得名。颜色为灰色、浅黄色、褐色。其化学组成为 FeCO_3 ，亦可写成 $\text{FeO} \cdot \text{CO}_2$ ，其中 FeO 62.1%， CO_2 37.9%。常混入镁、锰等的矿物。一般含铁较低，但若受热分解放出 CO_2 后品位显著升高，而且组织变得更为疏松，很易还原。所以使用这种矿石一般要先经焙烧处理。

2.1.1.2 铁矿石质量评价

铁矿石质量直接影响高炉冶炼效果，必须严格要求。通常从以下几方面评价：